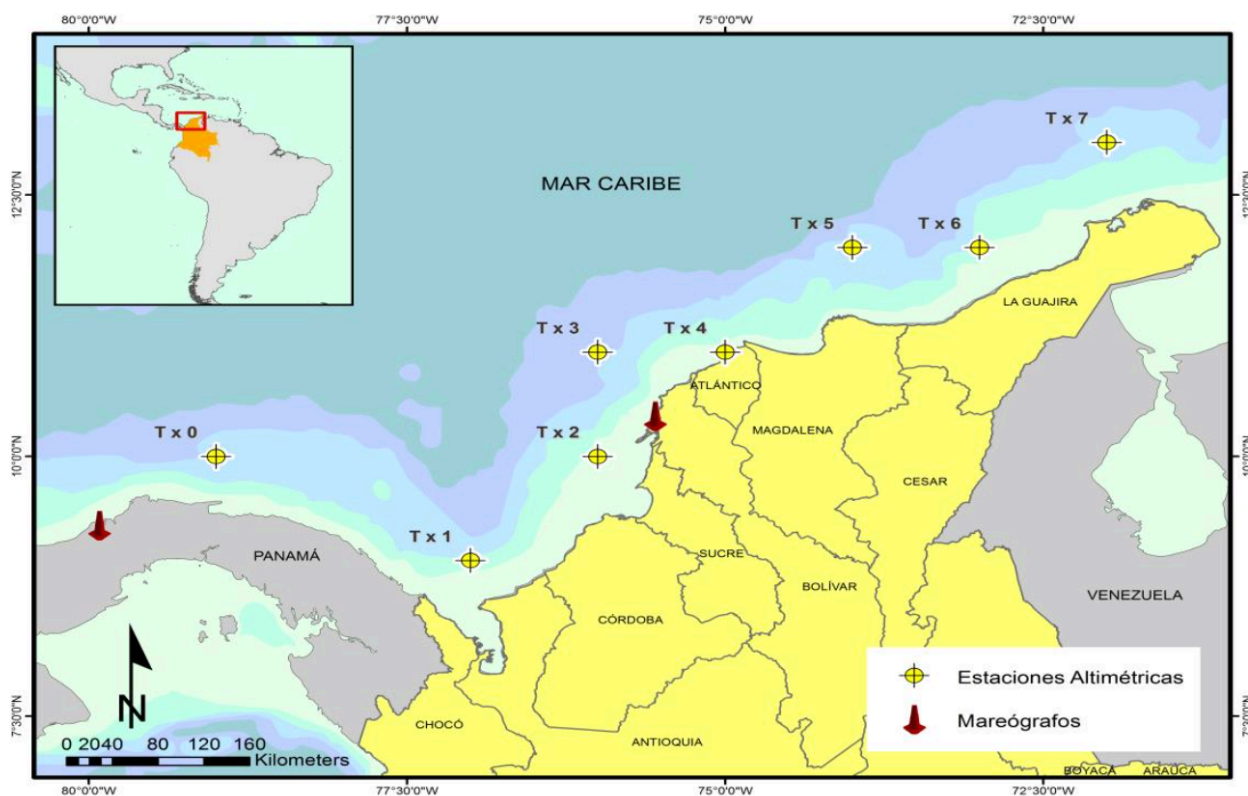


## ANEXO

### MÉTODOS COMPONENTE NIVEL DEL MAR

#### 1. Componente Eustático del Nivel del Mar, Costa Caribe colombiana y sector frontal a la Bahía de Cartagena

El área de estudio para el análisis de las tendencias del nivel del mar abarca la extensión completa del litoral Caribe colombiano continental, desde la península de la Guajira (Punta Gallinas) hasta el Golfo de Urabá (Cabo Tiburón). Se utilizarán los registros de nivel del mar de altimetría satelital derivados de las misiones TOPEX/Poseidon, Jason 1 y Jason 2, componiendo en conjunto una serie desde 1993 hasta 2015 (Nerem et al., 2010). Se seleccionarán los siete puntos geográficos de la base de datos que se encuentran más próximos a la línea de costa del Caribe colombiano continental (Figura 1). La Tabla 1 relaciona la posición geográfica de cada punto y los parámetros generales de los datos altimétricos disponible en el sitio web del Grupo de Investigación del Nivel del Mar de la Universidad de Colorado (Nerem et al., 2015).



**Figura 1.** Localización del área de estudio y los puntos con registros altimétricos considerados en el análisis de la tendencia del nivel del mar en el Caribe colombiano continental.

El análisis de las tendencias del nivel del mar en cada punto se realizará a partir de la estimación de la pendiente de regresión lineal de la serie de datos. El ajuste de la recta aplicado consiste en el método de los mínimos cuadrados, de manera que la pendiente de esta recta corresponde a la variación del nivel del mar (Davis, 2002). Los datos serán leídos y tratados a través de programas escritos con el software Matlab®. Para comprobar la confiabilidad estadística de los modelos de regresión se realizarán ANOVAS de varianza a los modelos de tendencia del nivel del mar. Como prueba adicional a las pendientes del

NM, se aplicará la función 'bootstrp' de Matlab que corre 1000 muestras para obtener el mejor estimado de los coeficientes de determinación.

**Tabla 1.** Relación de la ubicación geográfica de los puntos de medición del nivel del mar por altimetría satelital analizados en el estudio. Datos del Grupo de Investigación del Nivel del Mar de la Universidad de Colorado, disponibles en <http://sealevel.colorado.edu/content/interactive-sea-level-time-series-wizard>

Código Estación	Localización aproximada	Latitud	Longitud	No datos	Periodo de tiempo por satélite
<b>Tx1</b>	Urabá	9°N	77°W	802	TOPEX:
<b>Tx2</b>	Sucre	10°N	76°W	802	<b>1992-12-06 a 2002-01-10</b>
<b>Tx3</b>	Bolívar	11°N	76°W	802	
<b>Tx4</b>	Atlántico	11°N	75°W	802	
<b>Tx5</b>	Magdalena	12°N	74°W	801	Jason-1:
<b>Tx6</b>	Baja Guajira	12°N	73°W	802	<b>2002-01-15 a 2008-07-02</b>
<b>Tx7</b>	Alta Guajira	12°N	72°W	802	
<b>Tx0 – Referencia</b>	Panamá	10°N	79°W	802	Jason-2: <b>2008-07-03 al 2015</b>

## 2. Nivel Relativos del Mar: Datos mareográficos y de sensores de presión

Análisis de series de tiempo de elevación del nivel del mar por medio de la instalación de dos correntómetros Doppler ADCP Telesentynel 600 khz (Figura 2). Los instrumentos fueron instalados por la Universidad EAFIT en el año 2013 y serán re-instalados en otros sitios de la bahía. Las estaciones que cuentan actualmente con datos corresponden a la parte interna de la bahía son el sector Polonia y el costado sur (parte norte de la isla Barú), en cercanías de la estación geodésica Barú del programa GeoRED.



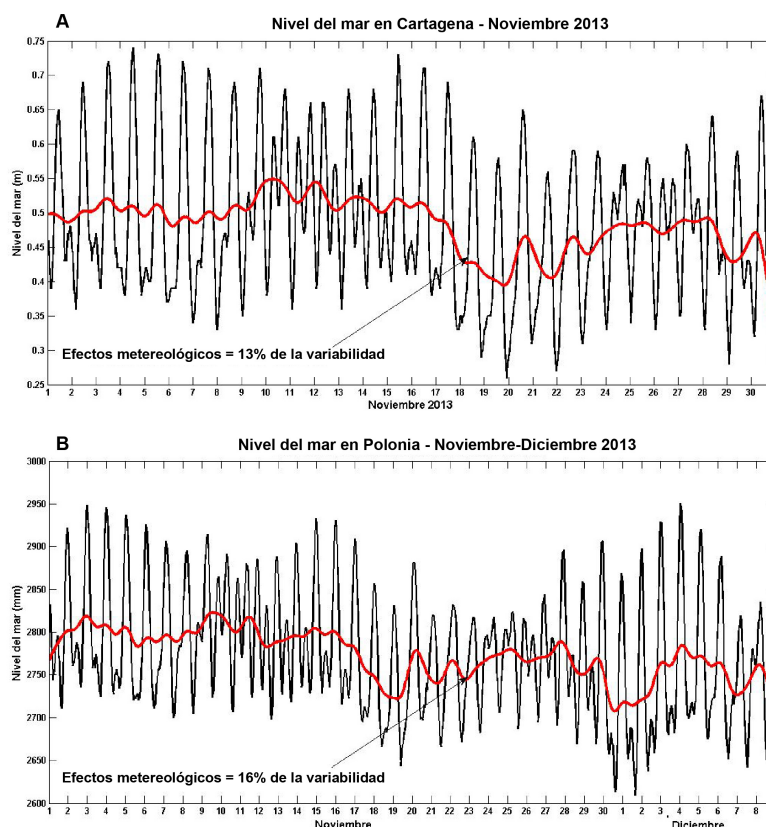
**Figura 2.** Foto de uno de los correntómetros ADCP con sensor de presión (Acoustic Doppler Current Profiler)-Telesentynel de la Universidad EAFIT. Obsérvese la estructura de base en PVC construida por ingenieros del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Eafit.

Las series del nivel del mar cada 20 min, a partir de los ADCPs, serán corregidas sustrayendo los dos metros de la ventana de blanqueamiento característica en estos equipos. Luego, los datos originales serán sometidos a análisis armónicos mediante el programa TIDES (Franco, 1992), para calcular

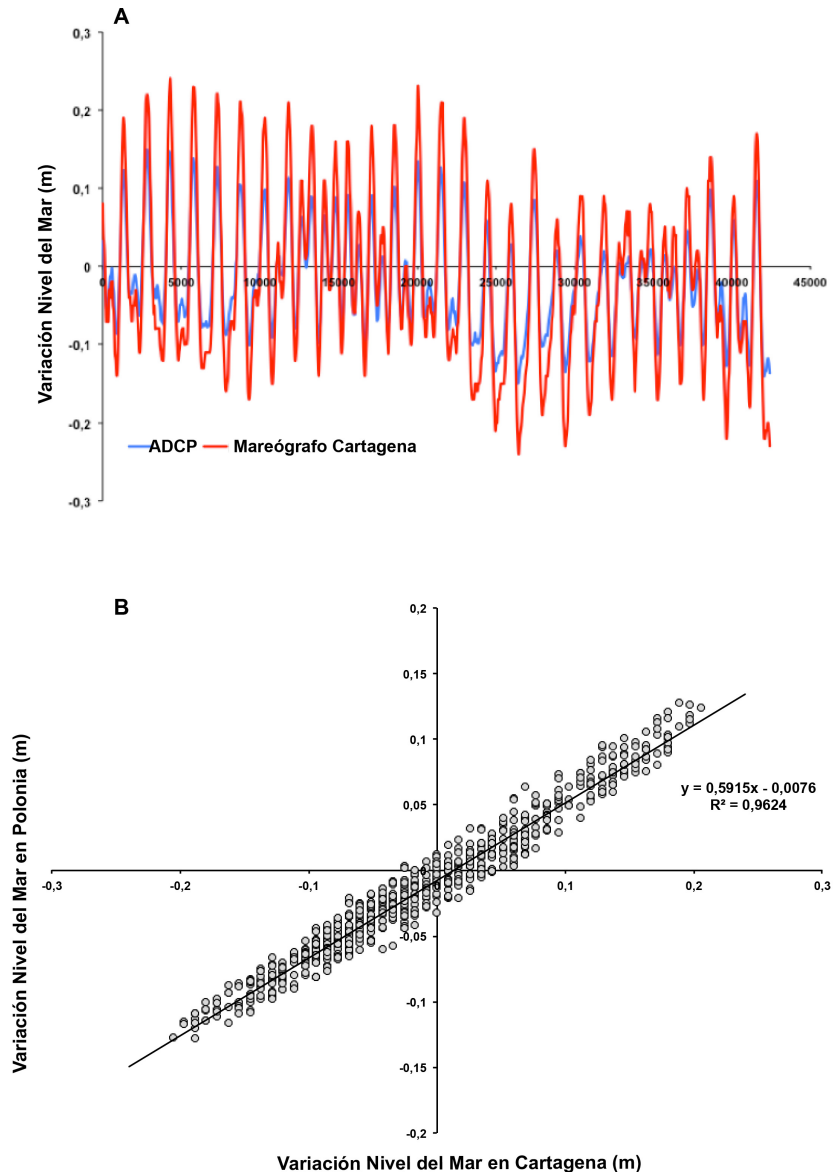
las amplitudes y fases de los constituyentes mareales y las estadísticas principales de las mareas. Con el fin de estimar el porcentaje de la varianza en los niveles del mar debidos a efectos meteorológicos y a otros factores de frecuencias bajas (p.ej. descargas fluviales), las variabilidades mareales semidiurnas y diurnas serán también filtradas con el mencionado filtro Butterworth de paso bajo (38 horas). Después, la variabilidad astronómica relativa del nivel del mar se obtuvo por medio de la suma de los cuadrados de las amplitudes medias de los constituyentes diurnos, semidiurnos y de aguas poco profundas (Restrepo y Kjerfve, 2002; Restrepo et al., 2002; Restrepo, 2008) (Figura 3).

La serie de datos horarios del Nivel Relativo del Mar (NRM) del mareógrafo de Cartagena 1995-2016 se obtendrá del Centro del Nivel del Mar de la Universidad de Hawai. Los datos faltantes serán ajustados mediante interpolación numérica utilizando el programa de análisis armónico de mareas TDES (Franco, 1992). La serie resultante de promedios interanuales será sometida a análisis de regresión con el fin de determinar la tendencia del NRM en Cartagena (Restrepo y López, 2008).

Para los modelos de tendencias del NRM, las series de niveles del mar en las estaciones ADCP serán correlacionadas con los datos del mareógrafo CIOH de Cartagena correspondientes al mismo mes de las series ADCP en el 2013 y a las series a obtener con nuevas instalaciones de ADCP. Los datos serán adquiridos en el IDEAM-Bogotá y CIOH Cartagena. Se generarán funciones de transferencia o ecuaciones de modelos de correlación lineal entre los valores mensuales del mareógrafo de Cartagena versus las series de niveles ADCP (Figura 4). Mediante estas funciones de transferencia o modelos resultantes de correlación, y después de las respectivas pruebas de confiabilidad estadística, estas funciones serán acopladas a cada estación Barú mediante la serie del mareógrafo de Cartagena 1955-2016. A las pendientes (mm) del NRM de cada estación, con el uso de las series de Cartagena 1955-2013, se les aplicará la prueba estadística bootstrap (Trauth, 2007) (Figura 5).

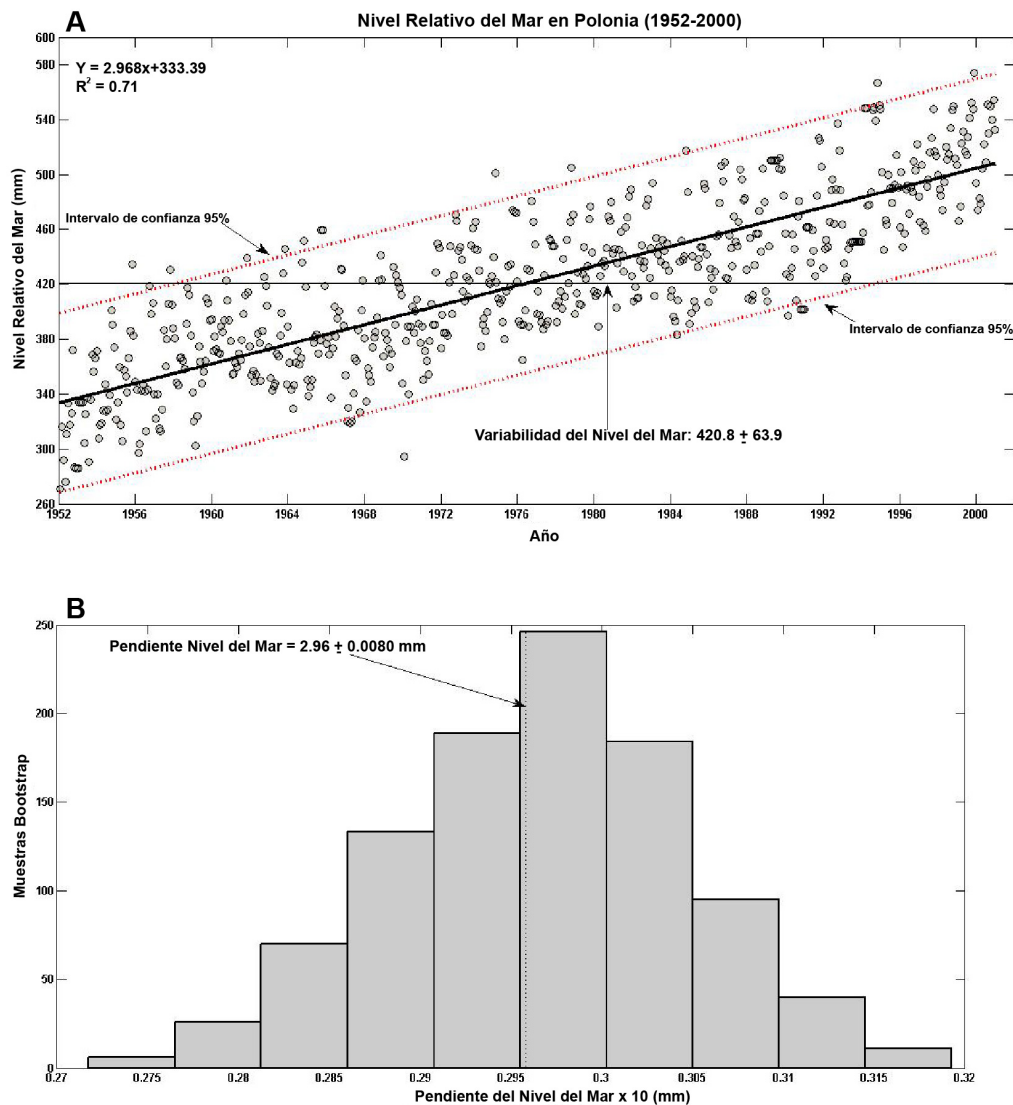


**Figura 3.** Ejemplo de series de tiempo de cambios del nivel del mar para los datos en bruto (línea negra) y los datos procesados con un filtro de paso bajo (línea roja) en la bahía de Cartagena. (A) Series del mareógrafo de Cartagena en el CIOH, sector de Manzanillo. (B) Series del ADCP en el costado sur oeste de la bahía. Los datos del nivel del mar corresponden al periodo entre el primero de noviembre y el nueve de diciembre de 2013. Con base en los datos mareales de la bahía interna, las mareas son responsables del 84% del total de variabilidad en los cambios del nivel del mar. El 16% restante se explica por procesos meteorológicos y de variabilidad en las descargas de caudal del Canal del Dique. Para las series del mareógrafo de Cartagena en el CIOH durante el mismo periodo de tiempo, las mareas explican el 87% de la varianza de los niveles, mientras que los procesos de largos periodos meteorológicos y de aportes fluviales, controlan el 13% de la variabilidad.



**Figura 4.** Ejemplo de funciones de transferencia entre datos mareográficos y los obtenidos con sensores de presión dentro de la Bahía de Cartagena. (A) Variación de los niveles mareales del mareógrafo de Cartagena en el CIOH (línea roja) y del ADCP (línea azul) en el costado sur de la bahía. (B) Diagrama de dispersión y modelo lineal de correlación entre los niveles del mareógrafo del CIOH-Cartagena y los del ADCP en Polonia, mostrando la ecuación y el coeficiente de determinación  $R^2$ . Por medio de esta función de transferencia de los niveles de Cartagena-CIOH, se acopla la serie del Nivel Relativo del Mar (NRM) 1952-2000 para el sector de sur de la bahía. El NRM promedio en la bahía es de  $420.8 \pm 63.9$  mm. En general, las predicciones están dentro del rango de desviación del 95% de confianza y el modelo es eficiente (prueba ANOVA  $p < 0.01$ ) con un coeficiente de determinación de  $R^2 = 0.71$ .



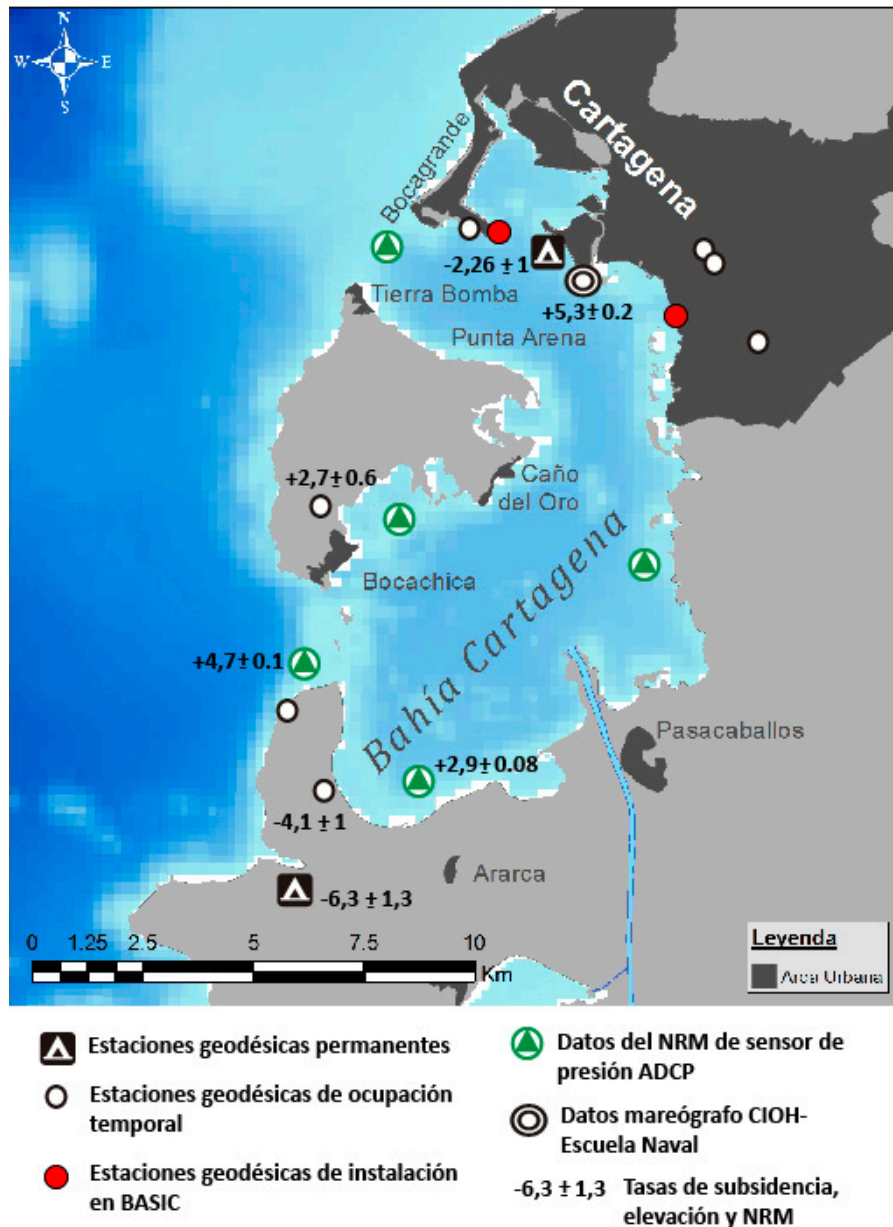


**Figura 5.** (A) Ejemplo de estimación final del NRM para sitios específicos de la bahía después de ajustar los datos mareográficos a las series obtenidas con sensores de presión en estaciones internas de la bahía, indicando los límites del 95% de confianza estadística, la variabilidad promedio del NRM, el modelo de ajuste lineal y el coeficiente de determinación  $R^2$ . (B) Histograma de los 1000 valores de pendiente del NRM en Polonia, obtenidos por medio de la función de re-muestreo bootstrap.

### 3. Estaciones Geodésicas: Datos de movimiento vertical (subsistencia o levantamiento)

En el marco del Programa de la Red Geodésica GeoRED del Servicio Geológico Colombiano se analizarán las series de las estaciones permanentes CIOH-Escuela Naval y Barú, como también las de las estaciones de ocupación temporal. Además, dentro del proyecto BASIC Cartagena Resiliente, Azul y Sostenible, se instalarán dos estaciones permanentes, una en Mamonal (muelle portuario) y otra en el Club Naval de Castillo Grande (ver mapa, Figura 6).

El procesamiento diario de los datos se hará con el programa GIPSY-OASS II del Jet propulsion Laboratory de la NASA (Zumberge et al., 2007). Posteriormente, estos datos son procesados con el programa HECTOR (Bos et al., 2013), mediante el cual se generan series de tiempo geodésicas y se estiman las velocidades de movimiento vertical.



**Figura 6.** Mapa de estaciones geodésicas de la región Bahía de Cartagena a partir de datos de sistema de navegación por satélite (Global Navigation Satellite System, GNSS) del programa GeoRED del Servicio Geológico Colombiano. Se muestran las tasas de subsidencia y elevación para las diferentes estaciones geodésicas (comunicación personal del equipo científico de GeoRED) y para los niveles de ascenso del NRM de datos del mareógrafo y de los sensores de presión ADCP.

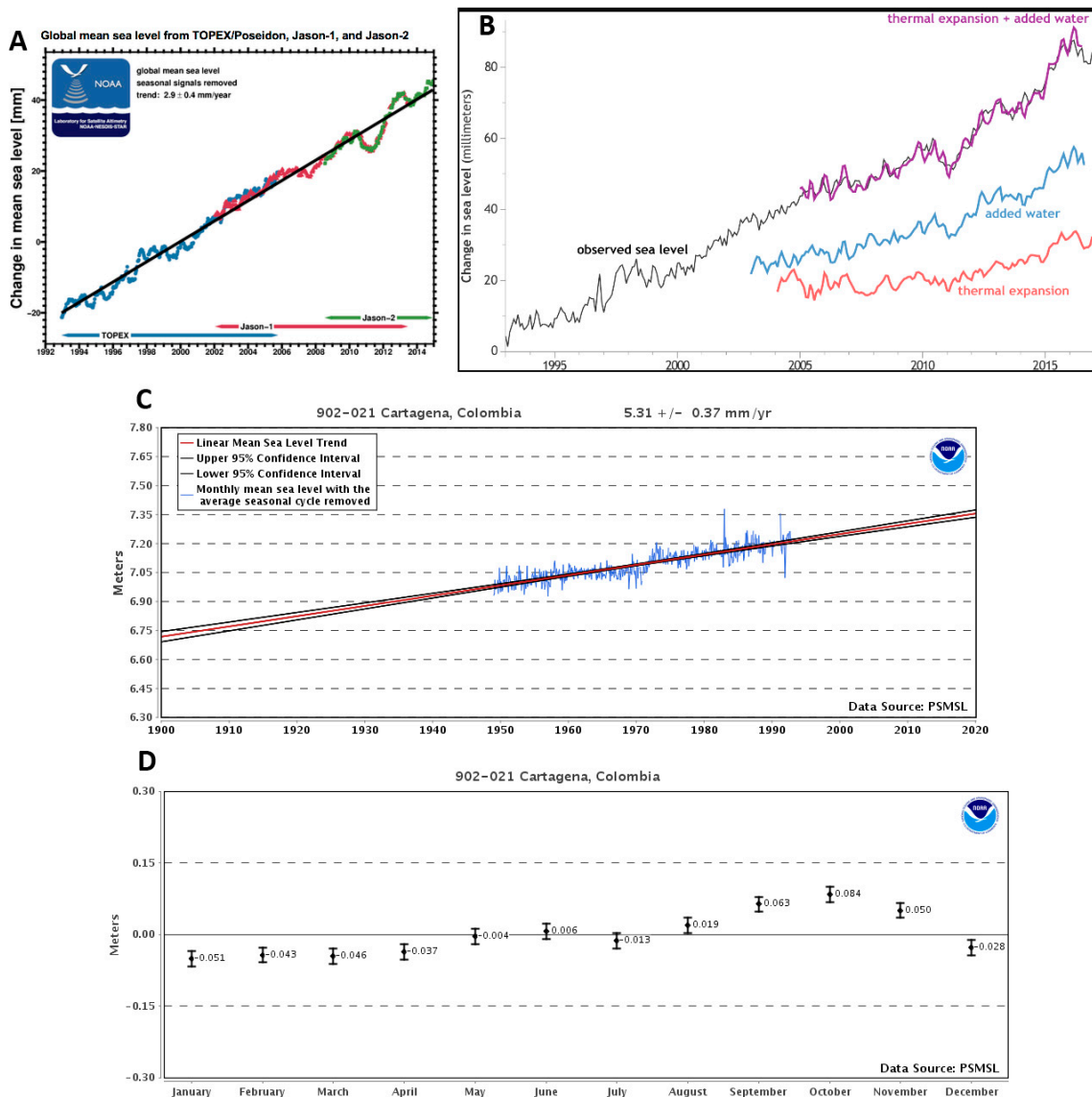
Adicionalmente, y para analizar con mayor alcance espacial las zonas de la bahía que presenten movimientos de orden vertical, como subsidencia o levantamientos, se hará **geodesia de imágenes, por medio del método de técnicas de InSAR (Interferometría de Radar de Apertura Sintética)**. El procesamiento de imágenes InSAR se hará usando los programas de tratamiento de imágenes radar del Program GeoRED en Bogotá.

Una vez obtenidas las series geodésicas tratadas y filtradas, se procederá a establecer la magnitud de movimiento vertical en diferentes sitios de la bahía y a calibrar las tasas del NRM de acuerdo con los valores de estos movimientos. Las tasas del NRM se obtendrán de: (1) las de este proyecto por medio de los datos de instalación de ADCP y de funciones de transferencia con

el mareógrafo del CIOH; (2) por el tratamiento de datos del mareógrafo de Cartagena con series hasta los años 2017-2018; (3) por medio de las estimaciones del NRM de otros estudios (p. ej., Torres et al., 2006; Andrade, 2008; Torres y Tsimplis, 2013; Andrade et al., 2017). Para establecer comparaciones con escenarios globales del nivel del mar, se consultarán las tendencias del IPCC (2013) y del Laboratorio de Altimetría por Satélite de la NOAA-NEDIS-STAR (Figura 7).

#### 4. Resultados esperados

- Tasas de ascenso del Nivel Relativo del Mar, a partir de series mareográficas y de sensores de presión hasta el año 2018.
- Implementación de dos nuevas estaciones geodésicas en la ciudad de Cartagena para la evaluación del nivel isostático del nivel del mar, una en el sector de Castillo Grande y otra en Mamonal.
- Análisis estadísticos de series temporales geodésicas para cuatro (4) estaciones permanentes y siete (7) de ocupación temporal del programa GeoRED, estableciendo las tasas de subsidencia o elevación de diferentes sectores costeros de la bahía.
- Análisis de imágenes radar InSAR para establecer tasas de subsidencia regional de la ciudad de Cartagena.
- Análisis de riesgos por inundación a partir de un análisis holístico de escenarios eustáticos e isostáticos del Nivel Relativo del Mar.



**Figura 7.** (A) Tendencia del nivel global del mar con base en altimetría satelital Topex Poseidon y Jason 1 y 2. (B) Tendencias del nivel del mar y componentes eustáticos. (C) Tendencia del nivel del mar en Cartagena con los intervalos del confianza al 95%. (D) Variación intra-anual del nivel del Mar en Cartagena. Obsérvese los incrementos entre agosto y noviembre, cuando se incrementan los aportes fluviales del Canal del Dique (Gráficas tomadas de <https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends.html> ).

### **Bibliografía revisada y citada**

- Andrade, C.A., 2008. Cambios recientes del nivel del mar en Colombia. En: J.D. Restrepo (editor), Deltas de Colombia: morfodinámica y vulnerabilidad ante el Cambio Global. Fondo Editorial Universidad EAFIT, COLCIENCIAS, pp. 101-121.
- Andrade, C.A., Ferrero-Ronquillo, A.J., León-Rincón, H., Mora-Páez, H., Carvajal-Perico, H., 2017. Sobre cambios en la línea de costa entre 1735 y 2011 y la subsidencia en la Bahía de Cartagena de Indias, Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* 41(158):94-106.
- Bos, M.S., Fernandes, R.M.S., Williams, S.D.P., Bastos, L., 2013. Fast Error Analysis of Continuous GNSS Observations with Missing Data. *J. Geod.* 87 (4): 351-360. doi: 10.1007/s00190-012-0605-0.
- Carvajal, J. H., 2016. Mud diapirism in the Central Colombian Caribbean Coastal zone. En: Hermelin, M. (editor). *Land- scapes and Landforms of Colombia*. Springer International Publishing. pp. 35-53.
- Davis, J., 2002, *Statistics and data analysis in geology*, New York, U.S.A., John Wiley & Sons, 638 p.:
- Franco AS., 1992. *Tides Programs for Prediction and Analysis: Manual*. Sao Pablo, Brasil, 45 pp.
- Gayet J. & Vernet G., 1989. Les lagunes côtières. *Bull. Inst. Geol. Bassin d'Aquitaine, Bordeaux*. 45: 107-121.
- International Panel for Climate Change, 2013. Informe de evaluación del cambio climático. Disponible en: [www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/)
- Kellogg J., Toto E., Cerón J., 2005. Structure and tectonics of the Sinú – San Jacinto accretionary prism in Northern Colombia. *X Congreso Colombiano de Geología*. pp 1-10.
- Nerem, R. S., Chambers, D. P., Choe, C., y Mitshum, G. T., 2010, Estimating mean sea level change from the TOPEX and Jason altimeter missions: *Marine Geodesy*, v. 33, no. SI, p. 435-446.
- Nerem, R. S., Choe, J., y Masters, D., 2015, CU Sea Level Research Group, Volume 2015: Colorado, United States of America: <http://sealevel.colorado.edu/content/interactive-sea-level-time-series-wizard> (Noviembre 2015).
- Restrepo JD, Kjerfve B., 2002. San Juan River Delta, Colombia: Tides, Circulation, and Salt Dispersion. *Continental Shelf Research* 22: 1249-1267.
- Restrepo JD, Kjerfve B, Correa ID, González J., 2002. Morphodynamics of a High Discharge Tropical Delta, San Juan River, Pacific Coast of Colombia. *Marine Geology* 192: 355-381.
- Restrepo JD, López SA., 2008. Morphodynamics of the Pacific and Caribbean Deltas of Colombia. *Journal of South American Earth Sciences* 25: 1-21.



- Torres, R., Gómez, J., Afanador, F., 2006. Variación del nivel medio del mar en el Caribe colombiano. Boletín Científico CIOH. 24: 64-72.
- Torres, R. R. & Tsimplis M. N., 2013. Sea-level trends and interannual variability in the Caribbean Sea. J. Geophys. Res. Oceans. 118: 2934-2947. doi:10.1002/jgrc.20229
- Trauth M., 2007. Matlab Recipes for Earth Sciences. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 288 p.
- Vernette, G., 1985. La plate-forme continentale caraïbe de la Colombie (du débouché du Magdalena au Golfe de Morrosquillo). Importance du diapirisme argileux sur la morphologie et la sédimentation. Thèse Doct. Etat, Bordeaux, 834, 387 p.
- Vernette, G., 1989. Examples of diapiric control on shelf topography and sedimentation patterns on the Colombian Caribbean continental shelf. Journal of South American Earth Science. 2 (4): 391-400.
- Zumberge, J.F., Heflin, M.B., Jefferson, D.C., Watkins, M.M., Webb, F.H., 1997. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. Journal of Geophysical Research. 102 (B3): 5005-5017. doi: 10.1029/96JB03860.